

### 3. *Der Temperaturkoeffizient der elektrischen Doppelbrechung in Flüssigkeiten;* *von C. Bergholm.*

Im elektrischen Felde haben die parallel und senkrecht zu den Kraftlinien polarisierten Strahlen eine vom Mittel abhängige Ungleichheit ihrer Geschwindigkeiten. Die Phasendifferenz ( $\Delta$ ) wächst mit dem Quadrate der Feldstärke ( $V$ ) und der Länge  $l$  der durchgestrahlten Schicht.

$$\Delta = B \cdot l V^2.$$

$B$ , der sogenannte Kerrsche Konstant, ist eine Funktion der Wellenlänge des verwendeten Lichtes und der Temperatur des betreffenden Stoffes.

Die Ursache der elektrischen Doppelbrechung ist noch nicht ganz klar. Voigt<sup>1)</sup> glaubt den Grund der Erscheinung in einer direkten Beeinflussung der Eigenfrequenzen der Elektronen zu erblicken. Nach Langevin<sup>2)</sup> dagegen liegt der Grund darin, daß die in elektrischer, magnetischer und optischer Hinsicht unsymmetrischen Moleküle im elektrischen Felde sich so zu ordnen suchen, daß die Richtung, wo die Polarisation am kleinsten ist, parallel der des äußeren Feldes wird. Obgleich die Wärmebewegung in hohem Grade dieser Orientierung entgegenwirkt, kann man jedoch mit empfindlichen optischen Apparaten die Doppelbrechung, die die kleine Orientierung bewirkt, entdecken.

Diese Theorien geben beide dieselben Ergebnisse in bezug auf die Abhängigkeit der Doppelbrechung von der Feldstärke und der Wellenlänge; Ergebnisse, die mit den Experimenten übereinstimmen. In bezug auf die absolute Phasendifferenz zwischen dem parallel oder normal zu den Kraftlinien polarisierenden Komponenten gegenüber einer Welle, welche die

1) W. Voigt, *Magneto- und Elektrooptik* 1908.

2) P. Langevin, *Le Radium*, 7. p. 249. 1910.

Substanz in gleicher Länge außerhalb des elektrischen Feldes durchsetzt, geben die Theorien verschiedene Ergebnisse.

Die experimentellen Schwierigkeiten bei diesen Bestimmungen sind sehr groß. Die Ergebnisse, die Mc Comb<sup>1)</sup> und Himstedt<sup>2)</sup> erreicht haben, sind gegenwärtig mit beiden Theorien unvereinbar.

Wenn die elektrische Doppelbrechung von der Änderung, die das elektrische Feld in der Eigenfrequenz der Elektronen bewirkt, abhängt, muß der Temperaturkoeffizient sehr klein sein, dem Verhältnis bei der Drehung der Polarisationssebene im magnetischen Felde entsprechend. Der Temperaturkoeffizient der spezifischen Drehung in Nikotin ist + 0,03 Proz. per Grad, in Rechtsterpentinöl dagegen — 0,1 Proz. per Grad.

Nach Langevins Theorie, nach welcher die Wärmebewegung der Orientierung der Moleküle entgegenwirkt, muß der Temperaturkoeffizient groß und in bezug auf alle Stoffe negativ sein. Langevin<sup>3)</sup> hat auch folgenden quantitativen Zusammenhang zwischen dem Kerrkonstant ( $B$ ) und der Temperatur aufgestellt.

$$B = \frac{(K - 1)(K + 2)(n^2 - 1)(n^2 + 2) \cdot \delta \cdot \delta_0}{40 \pi R T c \lambda n}.$$

$K$  = die Dielektrizitätskonstante,

$n$  = der ursprüngliche Brechungsindex,

$R$  = die universelle Gaskonstante,

$T$  = die absolute Temperatur,

$c$  = die Anzahl der Grammoleküle pro Volumeinheit,

$\lambda$  = die Wellenlänge,

$\delta$  = Maß der elektrischen Anisotropie der Moleküle,

$\delta_0$  = Maß der optischen Anisotropie der Moleküle.

Um ein Urteil über die aufgestellten Theorien gewinnen zu können, habe ich experimentell die Gültigkeit dieses Gesetzes in bezug auf Schwefelkohlenstoff, Metaxylol, Brombenzol und Nitrobenzol untersucht. Die Werte der letzten Flüssigkeit habe ich von Cotton und Motton<sup>4)</sup> geholt.

1) McComb, Phys. Rev. **6**, p. 180. 1915.

2) F. Himstedt, Ann. d. Phys. **48**, p. 1061. 1915.

3) P. Langevin, l. c. p. 256.

4) A. Cotton u. H. Motton, Ann. de Chem. et de Phys. **20**, p. 235. 1910.

Diese haben in derselben Weise wie Schmidt<sup>1)</sup> und Leiser<sup>2)</sup> Observationen gemacht, während der Kondensator, der mit warmer Flüssigkeit gefüllt war, abgekühlt wurde. Cottons und Mottons Werte für Nitrobenzol sind ziemlich unsicher auch deswegen, daß Nitrobenzol ein so guter Leiter ist, daß die Temperatur wegen Joulscher Wärme mit  $0,1^{\circ}$  pro Minute während des Versuches stieg. Schmidt und Leiser haben Schwefelkohlenstoff innerhalb eines sehr kleinen Temperaturgebietes untersucht. Ihre Werte können deshalb kaum bei einer quantitativen Prüfung verwendet werden.

### Versuchsanordnung.

Der Aufbau der optischen Apparatur ist aus Fig. 1 ersichtlich. Das Licht einer Bogenlampe ( $B$ ) wurde durch ein Linsensystem ( $L_1$ ) auf den Kollimatorschlitz ( $Sp_1$ ) eines Spektro-

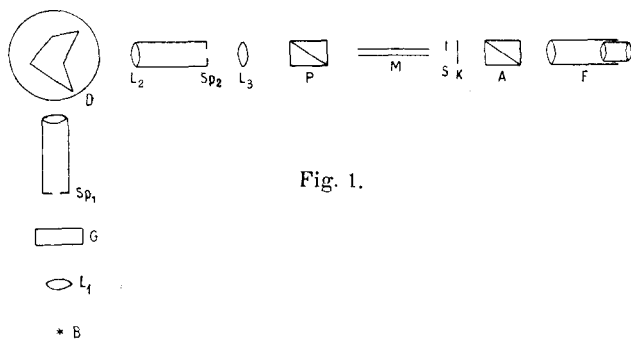


Fig. 1.

eters geworfen. Zwischen  $L_1$  und  $Sp_1$  wurde ein planparalleles Glasgefäß ( $G$ ) (6 cm breit und mit  $\frac{1}{2}$  Proz. Kupfersulfatlösung gefüllt) eingeschoben, um die Wärmestrahlen zu entfernen. Als Dispersionssystem ( $D$ ) benutzte ich ein von Pellin und Broca angegebenes Prisma mit konstanter Abweichung von  $90^{\circ}$ .<sup>3)</sup> Die von dem Prisma kommenden parallelen Strahlen werden mittelst einer Linse ( $L_2$ ) auf einen Spalt ( $Sp_2$ ) konzentriert. Durch Drehung des Prismas bringt man verschiedene gefärbte Strahlenbüschel durch diesen (Spektralgebiet =  $15 \mu\mu$ ). Diese Strahlen werden von einer

1) W. Schmidt, Ann. d. Phys. 7. p. 171. 1902.

2) R. Leiser, Diss. Karlsruhe 1910.

3) Vgl. F. Löwe, Zeitschr. f. Instrumentenkunde 27. p. 274. 1907.

Linse ( $L_3$ ) aufgesammelt, deren Brennweite so gewählt ist, daß alle Strahlen durch ein polarisierendes Nicolsches Prisma ( $P$ ) gehen, und durchsetzen der Reihe nach den mit Flüssigkeit gefüllten Meßkondensator ( $M$ ), den empfindlichen Streifen ( $S$ ), der nur ein Teil des Gesichtsfeldes deckt, den Kompensator ( $K$ ), der in einer mit Teilkreis versehenen Fassung drehbar angeordnet ist, und den Analysator ( $A$ ), um dann durch das Fernrohr ( $F$ ), das zur Beobachtung des empfindlichen Streifens dient, in das Auge zu gelangen. Die beiden gekreuzten Nicols sind so orientiert, daß ihre Schwingungsebenen mit den Kondensatorflächen einen Winkel von  $45^\circ$  bilden. Der empfindliche Streifen ist im Azimut  $45^\circ$  im Verhältnis zur Schwingungsebene des aus dem Polarisator tretenden Lichtes eingeführt. Bei einer gewissen Stellung des Kompensators erhält man gleiche Helligkeit über dem ganzen Gesichtsfelde. Wird die Spannung an den Meßkondensator angelegt, wird die vorher gemachte Einstellung zerstört; wenn aber man den Kompensator dreht, kann man wieder Gleichheit der Felder erreichen. Aus der Drehung ( $\Theta$ ) des Kompensators wird die Phasendifferenz ( $\Delta$ ) der doppelbrechenden Substanz berechnet aus der Formel:

$$\operatorname{tg} \Delta = 2 \cos (2 \varphi_0 \pm \Theta) \sin \Theta \sin \delta.$$

$\delta$  = die Phasendifferenz des Kompensators für eine gewisse Wellenlänge,  $\varphi_0$  = eine Konstante.

In bezug auf die theoretische Herleitung dieser Formel sowie die Justierung und Graduierung des Apparates vergleiche C. Bergholm, Uppsala Universitets Arskrift 1915.

Der Meßkondensator mit Flüssigkeit gefüllt und mit angelegter Hochspannung kann nicht um die Achse des Apparates in derselben Weise wie eine feste doppelbrechende Substanz gedreht werden. Um den Meßkondensator so einzustellen, daß seine planen Flächen einen Winkel von  $45^\circ$  mit den Schwingungsebenen des gekreuzten Nicols bildeten, war der Apparat, den ich verwendete, so konstruiert, wie Fig. 2 zeigt.

Die Messingstange ( $A$ ) trägt den Polarisator ( $P$ ) und eine Kreisscheibe ( $C$ ). ( $B$ ) trägt den empfindlichen Streifen ( $S$ ), den Kompensator ( $K$ ), einen Teilkreis in Minuten graduiert, den Analysator ( $N$ ) und das Fernrohr ( $F$ ). Die verschiedenen Teile können sowohl gleichzeitig als voneinander unabhängig gedreht werden.

Die oben erwähnte Einstellung wurde in folgender Weise gemacht. Bei abgeschalteter Spannung stellt man den Kompensator auf gleiche Helligkeit über das ganze Gesichtsfeld ein. Bei angelegter Spannung tritt der empfindliche Streifen hervor. Man dreht den Polarisator und das System (B) (= den empfindlichen Streifen, den Kompensator, den Analysator und das Fernrohr) um seine Achse, so daß das Gesichtsfeld die ganze Zeit so dunkel wie möglich bleibt. Während

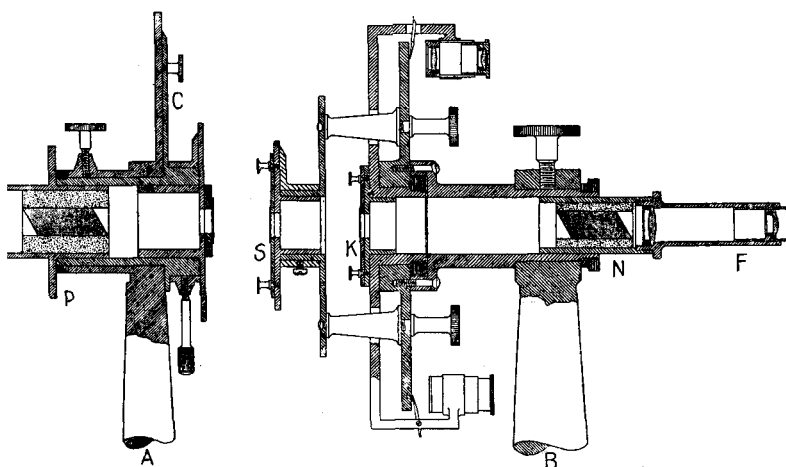


Fig. 2.

dieser Drehung tritt der empfindliche Streifen deutlich hervor. Wir nehmen an, daß er dunkel auf hellem Grund erscheint. Bei einer gewissen Lage verschwindet der Streifen, um bei fortgesetzter Drehung hell auf dunklem Grund zu erscheinen. Die Lage, wo der empfindliche Streifen verschwindet, ist also leicht zu finden. In dieser Lage ist die Polarisationssebene des Polarisators den planen Flächen des Meßkondensators parallel. Wenn man den Polarisator um  $45^\circ$  und das System (B), bis das Gesichtsfeld so dunkel wie möglich wird, dreht, ist der Meßkondensator in  $45^\circ$  Azimut eingeführt.

Die Wellenlänge des zur Messung benutzten Lichtes wurde mit Hilfe eines Spektralapparates bestimmt. Die Skala dieses Spektralapparates war vermitteltst der Fraunhoferschen Linien in der üblichen Weise geeicht worden. Die verwendete Wellenlänge war  $534 \mu\mu$ . Bei dieser Wellenlänge war  $\delta = 7^\circ 28'$  und  $2\varphi_0 = 10^\circ$ .

Die Konstruktion des Meßkondensators geht aus Fig. 3 hervor. Der Meßkondensator bestand aus einem Messingkasten (K) (20,5 cm lang, 4,5 cm breit und 2,0 cm tief). In diesem ruhte auf vier Porzellanzylindern (P) (2,6 mm hoch und 3 mm in Diameter) eine Messingscheibe (S) (20 cm lang, 3,8 cm breit und 2 mm dick). Die Scheibe wurde in unveränderter Lage durch die Porzellanzylinder und zwei Glaszylinder (G) (6 mm in Diameter und 15,4 mm hoch), die zwischen die Scheibe und den angelöteten Deckel des Kastens eingeklemmt wurden, festgehalten. In dem Deckel waren zwei kreisförmige Löcher (Diameter 1,5 cm). Durch das eine wurde ein Metalldraht (D) eingeführt, der in die Scheibe (S) geschraubt wurde und der mit der Hochspannungsbatterie

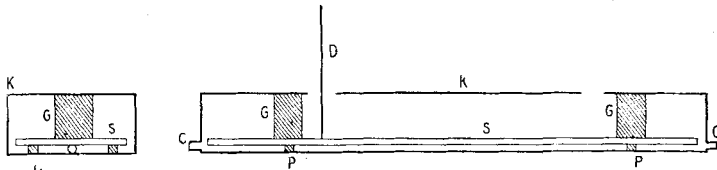


Fig. 3.

verbunden war. Durch das andere wurde der Thermometer eingeführt. In den beiden gegenüberliegenden kurzen Seiten waren zwei kleine Löcher, um das Licht durch den Kasten zu erhalten. Über diesen waren Zylinder (C) gelötet. Auf den plangeschliffenen Zylinderenden wurden Deckgläser befestigt. Dies zeigte sich am Anfang sehr schwer. Diejenigen Stoffe, die nicht von den warmen, organischen Flüssigkeiten gelöst wurden, wurden bisweilen schon bei Zimmertemperatur und immer bei Erwärmung doppelbrechend. Zuletzt fand ich, daß die beste Weise zu verhindern, daß Spannungen in den Deckgläsern entstanden, war, sie mit reiner Gelatine, in glyzerinhaltigem Wasser aufgelöst, zu befestigen. Um zu verhindern, daß Reflexionen gegen die Metallflächen des Meßkondensators entstanden, waren diese nach der Salpetersäuremethode mattgebrennt.

Um die Doppelbrechung der Flüssigkeiten bei verschiedener Temperatur zu beobachten, verwendete ich einen rechteckigen Kasten (25,5 cm lang, 18 cm breit, 11 cm hoch) aus Weißblech, durch welchen ein Blechrohr von solcher Größe

ging, daß der Meßkondensator eben noch darin eingeführt werden konnte. Senkrecht zum Rohre waren zwei kleine Rohre gelötet, die den Deckel des Kastens durchliefen. Durch diese Rohre, die inwendig mit Porzellan gekleidet waren, wurden die Hochspannungsleitung und das Thermometer eingeführt. Daneben waren im Deckel zwei Löcher für Thermometer und Rührer im äußeren Gefäß. Der Rührer wurde von einem elektrischen Motor getrieben. Die Thermometer waren in halben Graden graduirt. Der Kasten wurde mit Petroleum gefüllt und vermittelst eines elektrischen Stromes erhitzt, der durch einen auf den Boden des Kastens befindlichen Drahtwiderstand ging. Wenn die erwünschte Temperatur erreicht war, wurden die äußeren Widerstände so reguliert, daß die Temperatur unverändert blieb. Um den Wärmeaustausch mit der Umgebung zu vermeiden, war der Kasten mit Asbest und Pappe bekleidet. Über den ganzen Kasten wurde ein Holzkasten, mit Asbest und Pappe bekleidet, geschoben. Messungen bei niedrigen Temperaturen wurden mit dem Kasten mit Eis gefüllt gemacht. Um die Bildung von Wasser auf dem Meßkondensator zu verhindern, wurde Chlorealcium in das Blechrohr neben dem Kondensator eingeführt, der viel kürzer als das Rohr war.

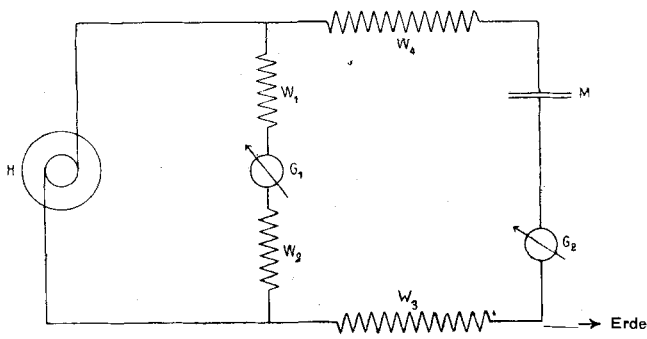


Fig. 4.

Die elektrische Instrumentierung geht aus Fig. 4 hervor. Die Spannung wurde von einer Hochspannungsmaschine (H) für Gleichstrom erhalten. Die Klemmspannung konnte von 500 bis 10000 Volt variiert werden.  $W_1$  und  $W_2$  sind zwei Metalldrahtwiderstände. Die Summe der Widerstände in diesen wurde zu 977300 Ohm bestimmt.  $W_3$  und  $W_4$  sind

Flüssigkeitswiderstände von  $4,10^5$  und  $5,10^5$  Ohm. Die Spannung wurde mittelst des Galvanometers  $G_1$  bestimmt, dessen Ausschläge mit der Spannung im Intervalle 500 bis 5000 Volt proportional waren. Ein Teilstrich entsprach 12,34 Volt. Das Galvanometer  $G_2$ , das eine Empfindlichkeit von  $10^{-8}$  Amperes hatte, wurde zur Kontrollierung verwendet, ob der Meßkondensator ( $M$ ) genügend isolierend war. Der Ausschlag dieses Galvanometers war bei einer Spannung auf dem Meßkondensator von 1000 Volt höchstens 10 mm. In den meisten Fällen war der Ausschlag 2—4 mm.

#### Messungen.

Der Schwefelkohlenstoff, der bei den Messungen verwendet wurde, wurde durch Destillierung unmittelbar vor dem Gebrauch gereinigt. Die übrigen Flüssigkeiten waren chemisch rein von Kahlbaum bezogen.

Wenn der Kasten ( $K$ ) Fig. 3 eine andere Temperatur als die Scheibe ( $S$ ) hat, wird die Flüssigkeit doppelbrechend, obgleich keine elektrische Spannung angelegt ist. Dieser „Temperatureffekt“ kann mehrere Minuten betragen. Bevor die Messung begann, hielt ich deshalb die Temperatur während wenigstens einer halben Stunde konstant.

Der Gang einer Messung war folgender: Der Nullpunkt des Galvanometers ( $G_1$ ) wurde abgelesen. Nach Zünden der Bogenlampe wird die Nullstellung des Kompensators abgelesen. Dann wurde die Spannung an den Meßkondensator gelegt und die Doppelbrechung mit dem Kompensator gemessen. Nach abgeschalteter Spannung wurde der Nullpunkt des Galvanometers und des Kompensators kontrolliert. Um zu zeigen, wie die einzelnen Messungen sich um den Mittelwert gruppieren, habe ich in Tab. 1 eine Meßreihe für Schwefelkohlenstoff bei  $39,9^0$  angeführt.

Tabelle 1.

$\Theta$	$\Delta \cdot 10^5$ in Wellenlänge	Ausschlag $a_1$ am Galvanometer $G_1$	$\frac{\Delta \cdot 10^5}{a^2}$
$11^0 24'$	812	197,2	20,90
$12^0 19'$	877	204,3	21,04
$12^0 44'$	907	207,0	21,00
$13^0 10'$	946	212,9	20,83
$10^0 36'$	756	190,0	20,80
Mittel			20,91



Die einzelnen Messungen unterscheiden sich mit ungefähr 1 Proz. von dem Mittelwert.

Nach Langevin ist

$$B = \frac{(K-1)(K+2)(n^2-1)(n^2+2) \cdot \delta \cdot \delta_0}{40 \pi R T c \lambda n},$$

$$\delta = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\alpha_1 + 2 \alpha_2},$$

$$\delta_0 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + 2 \sigma_2},$$

wo  $\alpha_1, \alpha_2$  = die Momente des einzelnen Moleküls für die Feldstärke 1 parallel bzw. senkrecht zu seiner Achse und wo  $\sigma_1, \sigma_2$  = zwei dem Molekül eigentümliche Größen, die von dessen Eigenschwingungen abhängen und für sehr langsame erzwungene Schwingungen in die  $\alpha_1, \alpha_2$  übergehen.

$$\alpha_1 + 2 \alpha_2 = \frac{9 (K-1)}{4 \pi N (K+2)},$$

$$\sigma_1 + 2 \sigma_2 = \frac{9 (n^2-1)}{4 \pi N (n^2+2)},$$

$N$  = die Gesamtanzahl der Moleküle pro Volumeinheit.

Also

$$B_t = \frac{(K+2)^2 (n^2+2)^2 N^2 (\alpha_1 - \alpha_2) (\sigma_1 - \sigma_2)}{40 \pi R T c \lambda n},$$

$c$  = die Anzahl der Grammmoleküle pro Volumeinheit

$$= \frac{\text{Dichte}}{\text{Molekulargewicht}} = \frac{d}{M}.$$

( $N$ ) ist proportional der Dichte ( $d$ )

$$B_t = \text{Konst.} \frac{(K+2)^2 (n^2+2)^2 \cdot d}{T n}.$$

Die Dielektrizitätskonstante ( $K$ ), der Brechungsindex ( $n$ ) und die Dichte ( $d$ ) hängen von der Temperatur ( $t$ ) ab. Die in den Tabellen angegebenen Werte wurden aus einer Kurve interpoliert, die nach den in den physikalisch-chemischen Tabellen von Landolt und Börnstein angegebenen Werten gezeichnet war. Mit Hilfe dieser Werte habe ich den Bruch  $B_t/B_{200}$  berechnet. Die erhaltenen Werte sind in der fünften Vertikalreihe angegeben. In einem Koordinatensystem habe ich die Temperatur ( $t$ ) in Celsiusgraden als Abszisse und den

Bruch  $B_t/B_{20}$  als Ordinate eingetragen und die theoretische Kurve gezogen. In demselben Diagramm habe ich die von mir experimentell gefundenen Werte durch Kreise angegeben. Jeder von diesen Werten ist Mittelwert aus wenigstens 15 verschiedenen Beobachtungen. Die beiden Kreuze in Fig. 5 sind diejenigen Werte, die Leiser für Schwefelkohlenstoff bei  $14^\circ$  und  $28^\circ$  gefunden hat.

Tabelle 2.  
(Schwefelkohlenstoff)

Temp. ( $t$ )	$K$	$n$	$d$	$\frac{B_t}{B_{20}}$
$0^\circ$	2,67	1,655	1,292	1,140
$10^\circ$	2,63	1,647	1,276	1,070
$20^\circ$	2,60	1,639	1,264	1,000
$30^\circ$	2,58	1,630	1,256	0,944
$40^\circ$	2,57	1,622	1,248	0,900

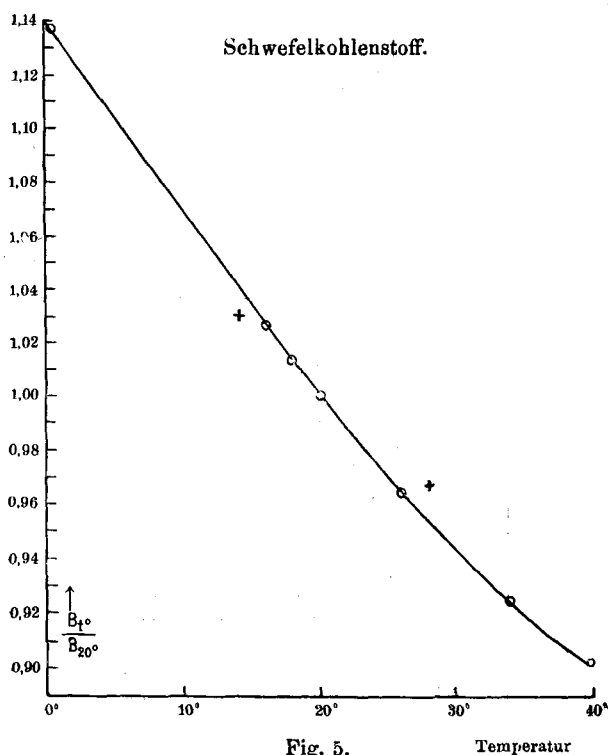


Fig. 5.

Temperatur

Tabelle 3.  
(Metaxylol)

Temp. (t)	K	n	d	$\frac{B_t^\circ}{B_{20}^\circ}$
0°	2,418	1,516	0,882	1,135
10°	2,396	1,508	0,874	1,060
20°	2,375	1,500	0,866	1,000
30°	2,356	1,494	0,857	0,950
40°	2,335	1,485	0,848	0,890
50°	2,315	1,476	0,840	0,845

Metaxylol.

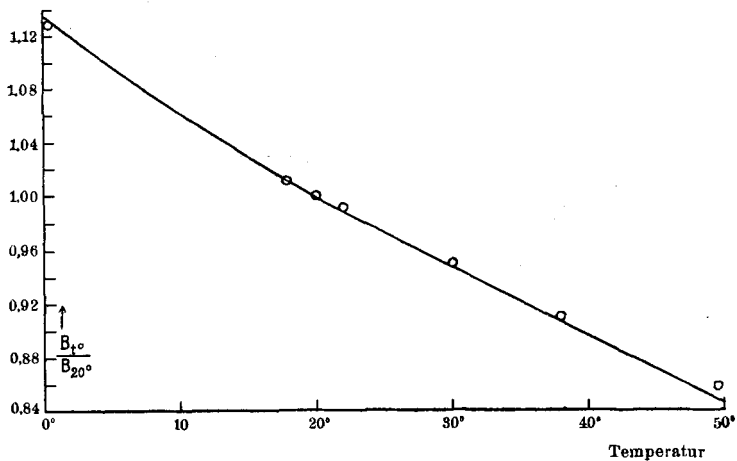


Fig. 6.

Tabelle 4.  
(Brombenzol)

Temp. (t)	K	n	d	$\frac{B_t^\circ}{B_{20}^\circ}$
0°	5,47	1,518	1,518	1,172
10°	5,37	1,574	1,504	1,081
20°	5,26	1,566	1,490	1,000
30°	5,09	1,557	1,476	0,908
40°	4,89	1,549	1,462	0,820
50°	4,64	1,540	1,448	0,724

## Brombenzol.

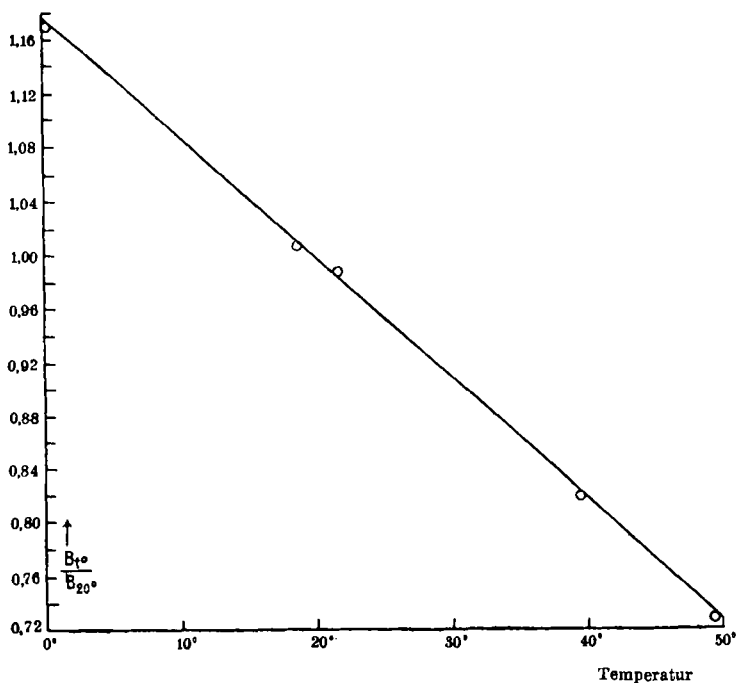


Fig. 7.

## Tabelle 5.

(Nitrobenzol)

Temp. (t)	K	n	d	$\frac{B_t}{B_{20^\circ}}$
0°	41,0	1,578	1,221	1,335
10°	38,9	1,570	1,213	1,163
20°	36,9	1,562	1,204	1,000
30°	35,1	1,554	1,196	0,871
40°	33,5	1,546	1,186	0,759

Aus der obigen Untersuchung geht also hervor, daß der experimentell bestimmte Temperaturkoeffizient der elektrischen Doppelbrechung in Schwefelkohlenstoff, Metaxylol, Brombenzol und Nitrobenzol quantitativ mit dem übereinstimmt, der theoretisch nach Langevins Theorie elektrischer

Doppelbrechung berechnet wird. Diese Übereinstimmung muß vorläufig als eine der wichtigsten Stützen der Richtigkeit dieser Theorie angesehen werden.

Nitrobenzol.

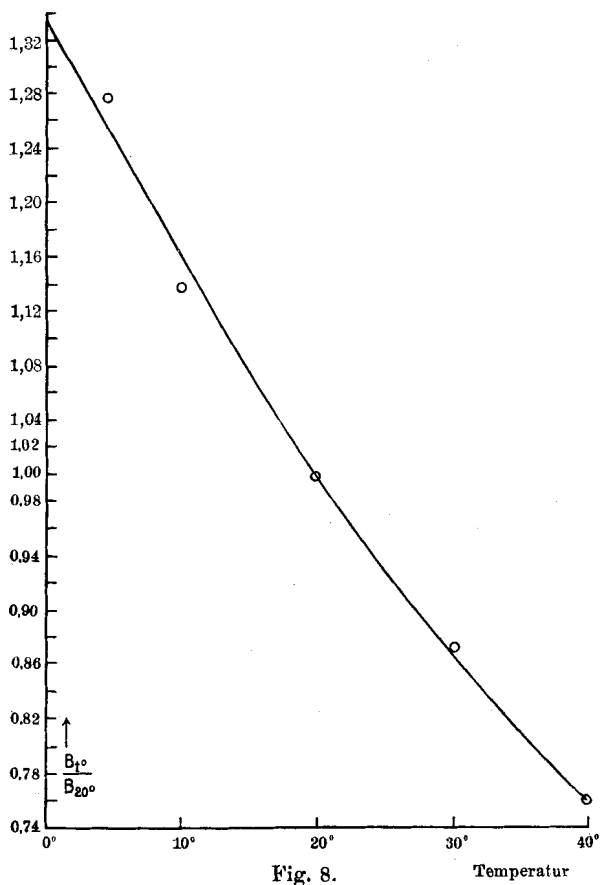


Fig. 8.

Dem Vorstand des Physikalischen Instituts der Universität Uppsala, Herrn Professor Dr. G. Granqvist, danke ich hiermit verbindlichst für die leihweise Überlassung physikalischer Instrumente.

Uppsala, Phys. Inst. der Universität, August 1916.

(Eingegangen 31. August 1916.)